

УДК 621.793.7

В.М. Тонконогий, д-р техн. наук; А.С. Сінковський, канд. техн. наук;  
О.В. Рибак, Одеса, Україна

## **АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ TiC – Ni(P) – Cu ПРИ РОЗРОБЦІ САПР ТП ШЛІФУВАННЯ ПОКРИТТІВ**

*У даній роботі наведені результати досліджень характеристик плазмових покриттів на основі композиційних порошків системи TiC – Ni(P) – Cu у процесі їхнього шліфування та подальшої експлуатації. Випробовування проводились в умовах, у яких передбачається подальше використання деталей з цим покриттям. Була виявлена залежність міцності зчеплення покриття з основою, когезійної міцності і пористості та інших критично важливих характеристик таких покриттів від параметрів процесу їхнього нанесення. При дослідженні покриттів на основі TiC – Ni(P) – Cu на зносостійкість за певних умов зношування не спостерігалось внаслідок явища вибіркового перенесення.*

*Ключові слова:* плазмові покриття, когезійна міцність

*В данной работе приведены результаты исследований характеристик плазменных покрытий на основе композиционных порошков системы TiC – Ni(P) – Cu в процессе их шлифования и дальнейшей эксплуатации. Испытания проводились в условиях, в которых предполагается дальнейшее использование деталей с этим покрытием. Была выявлена зависимость прочности сцепления покрытия с подложкой, когезионной прочности и пористости, а также других критически важных характеристик таких покрытий от параметров процесса их нанесения. При исследовании покрытий на основе TiC – Ni(P) – Cu на износостойкость при некоторых условиях изнашивание не наблюдалось, что объясняется явлением избирательного переноса.*

*Ключевые слова:* плазменные покрытия, когезионная прочность

*The results of the research of plasma coatings' characteristics during the process of their grinding and future maintenance are given in this article. Coatings are based on composite powders of titanium carbide plated with the solid solution of phosphorus in nickel and plated with copper afterwards. Investigation was carried out in the conditions which are supposed to be operating conditions for the details with these coatings in the future. It was discovered that the adhesive strength, cohesive strength and the porosity as well as some other characteristics of critical importance for the coatings depend on variables of plasma spraying process. During the investigation of the wear resistance of coatings based on TiC – Ni(P) – Cu under certain conditions wear was not observed at all. The reason for this is the selective transfer phenomenon.*

*Keywords:* coatings, cohesive strength

**Вступ.** На даний час одним з найбільш перспективних напрямків підвищення ефективності технологічних процесів фінішної обробки деталей є створення систем автоматизованого проектування шліфувальних операцій. Врахування значень керуючих параметрів та взаємозв'язків між ними, а також технологічних обмежень, що впливають на продуктивність процесу шліфування, дозволяє визначити оптимальні режими роботи для кожного

конкретного способу шліфування, матеріалу і розмірів шліфувального круга та інших умов. Особливо гостро постає питання розробки методики оптимізації процесу шліфування деталей з плазмовим покриттям, адже у цьому випадку поряд із триботехнічними властивостями, міцністю, твердістю і зносостійкістю слід вивчати пористість покриття та міцність зчеплення покриття з основою.

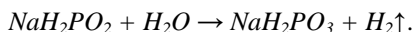
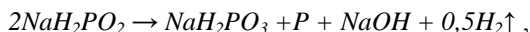
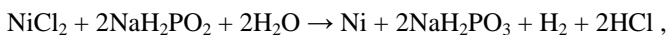
Використання композиційних матеріалів для плазмового напилювання відкриває шлях для інженерії робочих поверхонь деталей, наперед задаючи їхню структуру, а також хімічні та фізико-механічні властивості (наприклад, корозійну стійкість чи зносостійкість). Однак експлуатаційні характеристики та режими фінішної обробки покриттів не можна повною мірою визначити за їхньою товщиною і хімічним складом. Необхідно також враховувати матеріал підложки, режими напилювання та вибір плазмоутворюючого газу.

Саме тому **метою даної роботи** став аналіз взаємозв'язку експлуатаційних характеристик плазмових покриттів від умов їхнього одержання і визначення таких параметрів процесу нанесення покриттів, за яких використання деталей із зазначеним покриттям є найбільш ефективним.

**Аналіз попередніх досліджень.** Випробування плазмових покриттів на основі композиційних порошків карбіду вольфраму WC, а також карбіду титану TiC, плакованих твердим розчином фосфору в нікелі Ni(P), виявили їхню високу зносостійкість та інші переваги при використанні у промисловості [1, 2]. Аби покращити триботехнічні властивості цих матеріалів було вирішено ввести до їхнього складу мідь. Виходячи з теорії вибіркового перенесення, відкритого професорами Д.Н. Гаркуновим та І.В. Крагельським, спонтанне утворення тонкої плівки міді на поверхні значно зменшує зношування і коефіцієнт тертя деталей, що труться [3-5]. У межах проведених досліджень переважно вивчалися композиції на основі TiC, тому що він значно дешевший і менш дефіцитний ніж WC. Були розглянуті порошки з наступним співвідношенням компонентів: 30%TiC + 10%Ni(P) + 60%Cu; 40%TiC + 20%Ni(P) + 40% Cu; 40% TiC + 50%Ni(P) + 10% Cu; 50%TiC + 40%Ni(P) + 10% Cu. Після випробовування цих композицій на зношування у подальших експериментах було вирішено зупинитись на останніх двох композиціях.

**Методика плакування карбідів титану нікелем та міддю.** Процес плакування проводили хімічним методом із водних розчинів солей Ni та Cu. Для цього використовували порошки карбіду титану розміром від 40 мкм до 100 мкм. Склад ванни для нанесення нікелю наступний: хлорид нікелю ( $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) або сульфат нікелю ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), сульфат амонію  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , ацетат натрію ( $\text{CH}_3\text{COONa}$ ). В якості відновника використовували гіпофосфіт натрію ( $\text{NaH}_2\text{PO}_2$ ) та стабілізатори ОП-1 та ОП-2 рослинного походження, створені на кафедрі Технології конструкційних матеріалів та матеріалознавства Одеського національного політехнічного університету.

Ці стабілізатори дають можливість спрямовувати осадження в основному на частинки порошку, а не на стінки посудини. Як наслідок, ступінь осадження металу сягає 98% до повної прозорості розчину. Нагрівання розчину проводиться в емальованому посуді при температурі 90...100°C, рівень рН = 5,0.....5,5. В процесі нанесення нікелю розчин постійно перемішується, а також корегується кислотність ванни, щоб вона залишалась незмінною. При цьому в розчині спостерігається перебіг наступних реакцій:



Наведені реакції свідчать про те, що в результаті даного процесу на поверхні деталі осаджується не лише нікель, а й фосфор, кількість якого залежить від величини рН розчину. При нагріванні зразків з покриттям до температури 400°C розчинений в ньому фосфор взаємодіє з нікелем, утворюючи тверді фосфіди, які підвищують їхню зносостійкість. Фосфор також знижує коефіцієнт тертя деталей і зменшує зношування поверхонь, що труться. Коли процес плакування завершений, порошок промивається водою, потім спиртом, а далі поміщається в сушильну шафу при температурі 200°C, і витримується там дві години.

Наступною операцією для отримання зазначених композиційних порошків стало плакування міддю, яка теж наносилася хімічним методом. Склад ванни наступний: сульфат міді ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), винна кислота ( $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ ), щавлева кислота ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ ), гідразин солянокислий ( $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot 2\text{HCl}$ ), гідроксид амонію ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ), гідроксид натрію ( $\text{NaOH}$ ), етилендіамін ( $\text{H}_2 \cdot \text{NCH}_2 \cdot \text{CH}_2 \cdot \text{NH}_2$ ). Вагові величини компонентів визначаються за кількістю міді, необхідної для плакування порошку. Після плакування міддю порошок промивається та знову просушується.

**Матеріал та результати досліджень.** Процес нанесення покриттів проводився на плазмовій установці Київ-7. Режими напильовання були наступними: величина струму становила 200 А, напруга – 200 В. Відстань від перерізу сопла плазмотрона до місця розташування зразка, якої дотримувались під час нанесення покриттів, залежить від природи плазмоутворюючого газу. Найменшою вона була при використанні у якості плазмоутворюючих газів аргону і гелію. У цих газів відсутня дисоціація, а значить відсутня і теплота, яка виділяється при рекомбінації молекул, що знижує їхню ентальпію. Крім того, для цих газів характерний низький коефіцієнт тепловіддачі, що негативно впливає на нагрівання частинок порошку в потоці плазми. Надзвичайно важливою властивістю плазмових покриттів є адгезійна міцність їхнього зчеплення з основою, у якості якої найчастіше виступає сталь. Величину зчеплення вимірювали методом штифта

шляхом відриву його на розривній машині, яку використовують для визначення міцності дроту.

На рис.1 наведено графіки залежності міцності зчеплення плазмового покриття, що складається з порошку  $50\%TiC + 40\%Ni(P) + 10\%Cu$ , від відстані розташування зразка по відношенню до перерізу сопла плазмотрона. Криві 1, 2, 3 відповідають дозвуковому режиму напилування, при цьому для кривої 1 використовувався плазмоутворюючий газ аргон; для кривої 2 плазмоутворюючим газом був гелій; для кривої 3 – суміш повітря і 10% метану. Крива 4 характеризує надзвуковий режим, плазмоутворюючим газом слугувала суміш повітря і 10% метану.

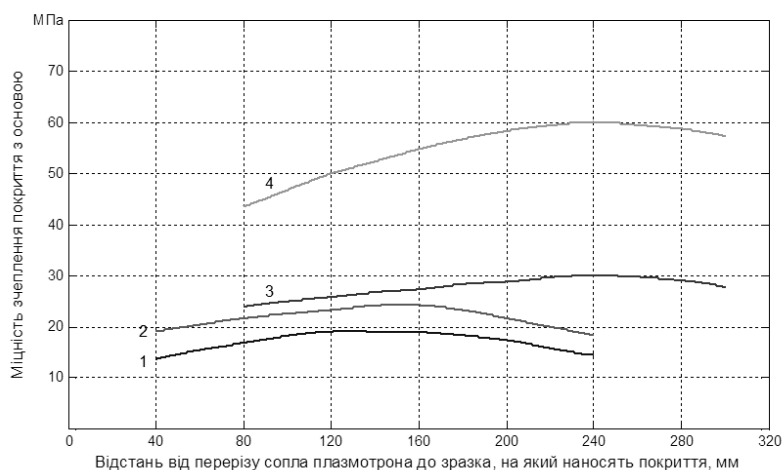


Рисунок 1 – Залежність міцності зчеплення плазмового покриття з основою від відстані розміщення зразка по відношенню до перерізу сопла плазмотрона

З графіків видно, що при дозвуковому напилуванні міцність зчеплення покриття з основою буде найвищою у випадку використання в якості плазмоутворюючого газу суміші повітря і метану. Це пояснюється тим, що нагрівання частинок порошку відбувається не лише за рахунок виділення теплоти під час реакцій рекомбінації та деіонізації, а ще й за рахунок теплоти згоряння продуктів розпаду метану. Але при надзвукових потоках плазмового струменю з використанням в якості плазмоутворюючого газу суміші повітря і 10% метану міцність зчеплення покриття з основою буде найбільшою.

Іншою важливою характеристикою плазмових покриттів є їхня когезійна міцність, яка в свою чергу в значній мірі залежить від величини пористості. Чим більші розміри частинок порошку, тим меншу кінетичну енергію вони

одержують, прискорюючись в потоці плазми, і до меншої температури прогріваються. Це призводить до зменшення міцності зчеплення між частинками в покритті і утворення пор.

На рис. 2 наведено графіки залежності значень пористості плазмового покриття на основі порошку  $\text{TiC} + \text{Ni(P)} + \text{Cu}$  для дозвукового (1) та надзвукового (2) режимів напилювання. З них видно, що зі збільшенням розмірів частинок, які входять до фракції, збільшується і пористість отриманого покриття як при дозвукових, так і при надзвукових режимах плазмового напилювання, хоча у другому випадку її значення значно менші.

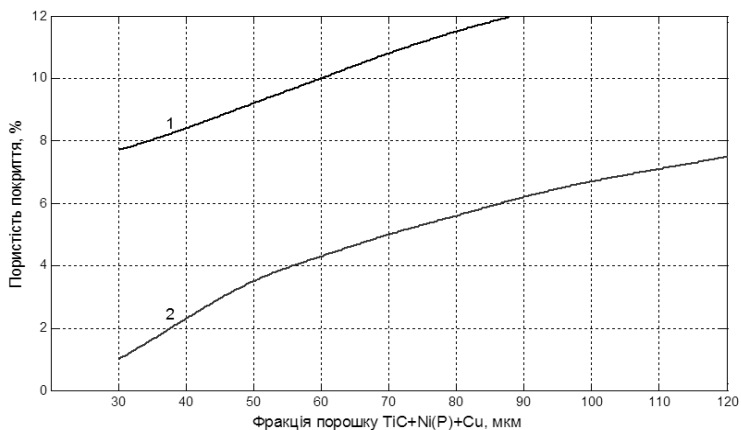


Рисунок 2 – Залежність пористості покриття від фракції використовуваного порошку  $\text{TiC} + \text{Ni(P)} + \text{Cu}$  при напилюванні у дозвуковому (1) і надзвуковому (2) режимах

З точки зору ефективної експлуатації та режимів кінцевої обробки покриттів виключно важливою характеристикою є їхня зносостійкість. Дослідження цієї характеристики проводилось у середовищах, в яких передбачається подальше використання деталей з таким покриттям. Під час випробувань в умовах граничного тертя (коефіцієнт тертя  $0,05 \pm 0,02$ ) зі швидкістю 14 м/с при тиску 10 МПа і пробігу в 100 км з використанням дизельного палива у якості мастила, покриття на основі порошку  $\text{TiC} + \text{Ni(P)} + \text{Cu}$  показали хороші результати [6, 7]. У табл. 1 наведені порівняльні дані досліджень покриттів з даного композитного порошку та інших матеріалів, які випробовувались в ідентичних умовах. Як видно з таблиці, зношення плазмових покриттів з порошку  $\text{TiC} + \text{Ni(P)} + \text{Cu}$  втричі менше, ніж одержаного таким самим методом покриття з ПН55Т45.

Таблиця 1 – Результати досліджень покриттів в умовах граничного тертя в парі з легованим чавуном

Матеріал покриття	Умови одержання покриття	Зношення, мкм	
		покриття	контргіла
Сталь-молібден	Газополуменева металізація дротом	-110	-40
PH55T45	Плазмове, надзвукове	-96	-27
Хром	Електроліз	-40	-20
40%TiC+50%Ni(P)+10%Cu	Плазмове, надзвукове	-30	-11

Композиція TiC + Ni(P) + Cu має ще більш високу зносостійкість і низький коефіцієнт тертя при використанні фреону в якості мастила. За умови правильного підбору контргіла і виду мастила в процесі тертя спостерігається вибіркове перенесення матеріалу покриття. Тому порошки TiC + Ni(P) + Cu викликають особливий інтерес у машинобудуванні і ремонтному виробництві. Покриття пройшли випробування на зношування на стенді впродовж 800 годин по системі вал-втулка при періодичному змащуванні фреоном і показали відсутність зношування в парі з підшипником із бронзи БрОЦС5-5. Коефіцієнт тертя склав 0,0075. Вибіркове перенесення при терті цієї пари також спостерігається у випадку використання в якості мастил індустриальних масел.

При розрахунках економічної складової одержання деталей з плазмовим покриттям важливим показником є коефіцієнт використання порошку (КВП). При плазмовому напилюванні деяка кількість порошку випаровується і окиснюється в газовому потоці, крім того, певна частина порошку розсіюється, особливо при нанесенні покриттів на круглі деталі типу шийок колінчастих і розподільчих валів автомобілів. Цей коефіцієнт залежить також від відстані між перерізом сопла плазмотрона та зразком. На рис. 3 наведена залежність КВП від дистанції напилювання порошку TiC + Ni(P) + Cu на плоску пластинку зі ст.3.

Окислювальна властивість потоку плазми згоряння в значній мірі залежить від вмісту метану в суміші з повітрям. При зменшенні його кількості ступінь окиснення порошку збільшується, а отже, зростають і втрати. На рис. 4. наведена залежність коефіцієнта використання матеріалу від вмісту метану в суміші.

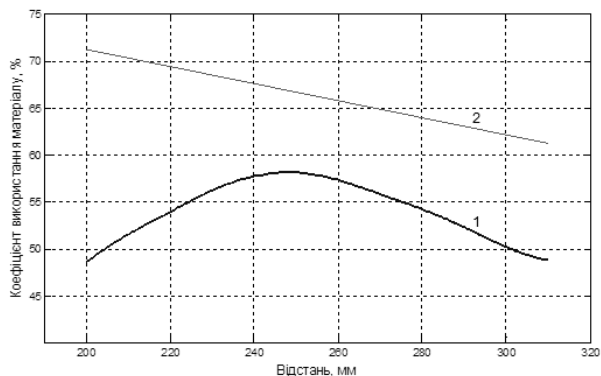


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта використання матеріалу від дистанції напилування на дозвуковому (1) і надзвуковому (2) плазмотронах при вмісті 10% метану у суміші

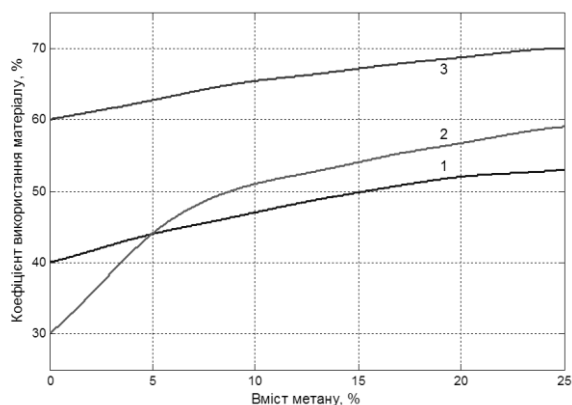


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта використання матеріалу від вмісту метану в суміші з повітрям.  
Дистанція напилування 300 мм (1, 2) і 250 мм (3).  
Витрати плазмотворюючого газу 7 м³/год (1, 3) і 5 м³/год (2)

**Висновки.** Плазмові покриття на основі композиційних порошків TiC + Ni(P) + Cu, створених за методикою плакування карбідів титану нікелем, кобальтом та міддю хімічним способом з розчинів солей цих металів, характеризуються особливо високою зносостійкістю. Зокрема, у випадку роботи цих покриттів в парі з контртілом із бронзи БрОЦС5-5-5 зношування зовсім відсутнє. Це пояснюється явищем вибіркового перенесення завдяки спонтанному утворенню тонкої плівки міді на поверхні контакту. Така

особливість розглянутих покриттів дає змогу використовувати їх при виготовленні надійних і довговічних елементів конструкцій космічних, морських надводних і підводних кораблів.

Зважаючи на велику перспективність плазмових покриттів, нанесених з порошків  $\text{TiC} + \text{Ni(P)} + \text{Cu}$ , слід звернути особливу увагу на умови їхнього одержання, адже міцність зчеплення покриття з основою, когезійна міцність і пористість та інші параметри, які є критично важливими під час експлуатації та кінцевої обробки покриттів, залежать від багатьох чинників, зокрема від розмірів частинок порошку для напилування і від того, який для цього використовувався плазмоутворюючий газ. Вибір звукового чи надзвукового режиму напилування також істотно впливає на якість отриманих покриттів. Проте для формування стратегічного рішення щодо параметрів процесу нанесення покриттів слід враховувати його економічну складову, адже чим більшим буде коефіцієнт використання порошку, тим вищою стане ефективність створення деталей з плазмовим покриттям зазначеного складу. Особливості умов одержання плазмових покриттів та їхній взаємозв'язок з характеристиками цих покриттів у подальшій експлуатації безпосередньо впливає на весь технологічний процес. Врахування цього взаємозв'язку є основою для створення системи автоматизованого проектування шліфування плазмових покриттів.

**Список використаних джерел:** 1. *Тонконогий В.М., Сінковський А.С., Рибак О.В.* Врахування властивостей композиційних порошків на основі  $\text{TiC}$ , плакованого  $\text{Ni(P)}$ , при розробці САІР ТП // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – Вип. 12. – Харків: ХТУ «ХП», 2017. – с. 31 – 41. 2. *Сінковський А.С., Рибак О.В.* Композиційні порошкові матеріали на основі карбиду вольфраму для газотермічного напилування // *Матеріали Міжнародної Інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2016)»*. – Вінниця: ТОВ "Нілан-ЛТД", 2016. – с.179 – 181. 3. *Крагельский И. В.* Трение и износ [Текст] / И. В. Крагельский. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1968. – 478 с. 4. *Гаркунов Д.Н.* Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности. Водородное изнашивание металлов. / М.: Изд-во МСХА, 2004. – 384 с. 5. *Крагельский И.В., Гаркунов Д.Н.* Диплом на открытие № 41. Бюллетень изобретений. № 17. – 1965. – 24 с. 6. *Петров С. В., Сінковський С. А.* Напыление композиционного порошка  $\text{TiC} - \text{Ni} - \text{Cu} - \text{P}$  в плазме продуктов сгорания. // *Порошковая металлургия*, 1993, №9 – 10. 7. *Петров С. В., Сааков А. Г.* Плазма продуктов сгорания в инженерии поверхности. – К.: 2000. – 218с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Tonkonogij V.M., Sin'kovskij A.S., Ribak O.V.* Vrahuvannja vlastivostej kompozicijnih poroshkov na osnovi  $\text{TiS}$ , plakovanogo  $\text{Ni(P)}$ , pri rozrobci SAPR TP / *Suchasni tehnologii v mashinobuduvanni*. – Vip.12. – Harkiv: HTU «HP», 2017. – s. 31-41. 2. *Sin'kovskij A.S., Ribak O.V.* Kompozicijni poroshkovi materialy na osnovi karbidu vol'framu dlja gazotermichnogo napyluvannja / *Materiali Mizhnarodnoi Internet-konferencii «Molod' v tehnikh naukah: doslidzhennja, problemi, perspektivi (MTN-2016)»*. – Vinnicja: TOV "Nilan-LTD", 2016. – s.179 – 181. 3. *Kragel'skij I. V.* Trenie i iznos – [2-e izd., pererab. i dop.]. – M.: Mashinostroenie, 1968. – 478 s. 4. *Garkunov D.N.* Nauchnye otkrytija v tribotehnike. Jefferkt bezyznosnosti. Vodorodnoe iznashivanie metallov. / M.: Izd-vo MSHA, 2004. – 384 s. 5. *Kragel'skij I.V., Garkunov D.N.* Diplom na otkrytie № 41. Bjulleten' izobretenij. № 17. – 1965. – 24 s. 6. *Petrov S.V., Sin'kovskij S.A.* Napylenie kompozitnogo poroshka  $\text{TiC} - \text{Ni} - \text{Cu} - \text{P}$  v plazme produktov sgorjanija. // *Poroshkovaja metallurgija*, 1993, №9 – 10. 7. *Petrov S.V., Saakov A.G.* Plazma produktov sgorjanija v inzhenerii poverhnosti. – K.: 2000. – 218s.